

論文 はりの曲げ実験による膨張コンクリートの初期応力・ひずみの推定

石田 邦洋^{*1}・濱岡 洋亘^{*2}・坂本 裕樹^{*3}・吉武 勇^{*4}

要旨：鉄筋による軸拘束を受けた膨張コンクリートでは、無載荷状態においても初期圧縮ひずみ、およびそれに伴う初期応力が作用しているものと推察される。そこで本研究では、膨張材量や材齢を主な実験パラメータとして RC はりの曲げ実験を行い、曲げ応力-ひずみ関係からみかけの圧縮ヤング係数を求めるとともに、それに初期圧縮ひずみを乗じることで、初期応力の推定を試みた。その結果、膨張コンクリートの曲げ応力に対する有効初期圧縮ひずみを推定することで、初期応力を受ける RC はりの曲げ強度を概ね適切に評価できた。

キーワード：膨張コンクリート、曲げ強度、初期圧縮ひずみ、初期応力

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の品質が重要視されるようになってきており、ひび割れの発生を防ぐことが、重要な課題となっている。コンクリートのひび割れ発生時期やその要因は、多種多様であるが、中でもコンクリート構造物の体積変化に起因した(初期)ひび割れは、耐久性・品質等に大きな影響をもたらす可能性が高い。

このような初期ひび割れの原因の例として、マスコンクリート構造物などの温度応力や、床版などの薄肉部材における早期の乾燥収縮等が挙げられる。この初期ひび割れ対策として、近年では膨張コンクリートがしばしば使用されるようになってきた。

膨張コンクリートは初期ひび割れ対策のみならず、その膨張作用を鉄筋などの補強材で拘束することにより、あらかじめコンクリートに初期応力(ケミカルプレストレス)を導入することで、鉄筋コンクリート(RC)部材の力学性状を向上させることが可能である。

初期応力を受ける RC 部材では、普通コンクリートと比べて異なる力学特性を示すが¹⁾、膨張コンクリートを有効に構造部材として活用するた

めには、体積変化の著しい若材齢期からの様々な力学性状を評価することが必要と考えられる。

そこで本研究では、膨張材量と材齢を主な実験パラメータとし、コンクリート自身に与える初期応力の影響を直接的に評価するため、断面中央に1本のみ鉄筋を配したRCはりの曲げ強度実験を行った。さらに、このRCはりの曲げ実験から得られた曲げ応力-ひずみ関係より、みかけの圧縮・引張ヤング係数を求めるとともに、それに初期圧縮ひずみを乗じることで、初期応力の推定を試みた。

2. RC はりの曲げ強度実験

2.1. 実験方法

(1) 配合条件

本研究のコンクリート材料には、橋梁 RC 床版への展開を念頭において、早強ポルトランドセメント C(密度 3.13g/cm³)と標準添加量 20kg/m³の石灰系低添加型膨張材 Ex(3.14g/cm³)を用いた。なお、その他の材料として北九州若松産海砂 S(密度 2.60g/cm³)、山口県宮野産の安山岩碎石 G(密度 2.70g/cm³)、およびリグニン系 AE 減水剤 Ad(C×1.5%)を用いた。本研究では、既報²⁾を参

*1 (株)ピーエス三菱 広島支店 修(工) (正会員)

*2 元 山口大学大学院 理工学研究科 修(工) (正会員)

*3 山口大学大学院 理工学研究科

*4 山口大学大学院 理工学研究科 准教授 博(工) (正会員)

考に表－１に示すような粉体量 $P(C+Ex)$ を一定とした 4 種類のコンクリートを作製した。すなわち、粉体量 $P=355\text{kg/m}^3$ 、水粉体比 $W/P=44\%$ と一定のもと、膨張材を用いない普通コンクリート(配合記号 Ex0)と、膨張材量を 20kg/m^3 (同 Ex20)、 30kg/m^3 (同 Ex30)、 40kg/m^3 (同 Ex40)とした膨張コンクリートを作製した。これらのコンクリートは前報¹⁾と同じ配合であり、各種材料強度については同報を参照されたい。

(2) 供試体と実験方法

本研究では、曲げひび割れに対する鉄筋の補強効果をできるだけなくすとともに、膨張コンクリートの長さ変化を軸方向に拘束するため、断面中央に鉄筋 1 本(D13, SD295A)のみ張出し埋設した RC はりを作製した。図－１に供試体形状および載荷方法を示す。なお図－１に示す供試体の寸法は、実際の橋梁 RC 床版サイズのおよそ 2/3 に相当する。次にこのような供試体を用いて、載荷点間距離 150mm、支点間距離 700mm とする 4 点載荷(荷重制御)を行い、その際、等曲げ区間(載荷点間)の上下面には、ひずみゲージを貼付し、曲げひび割れが生じるまで載荷荷重とひずみの計測を行った。なお本報では、この曲げひび割れが発生したときの載荷荷重を用いて曲げひび割れ発生応力(以下、本報では曲げ強度 f_f として表す)を求めた。

(3) 実験パラメータ

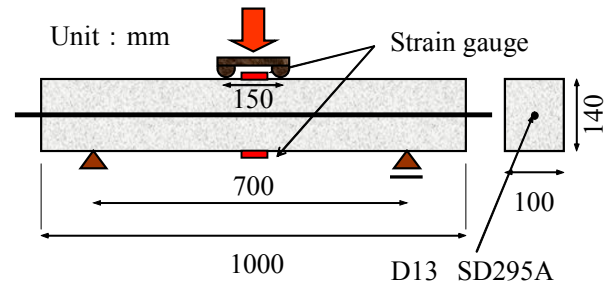
本研究では、膨張材量や材齢を主な実験パラメータとし、曲げ強度 f_f の変化を求めた。実験材齢は 3, 5, 7, 28 日とし、実験材齢までの間はいずれも湿布養生を施し、できるだけ乾燥の影響を受けないように湿布養生終了直後に曲げ強度実験を行った。なお、すべての供試体は打設後、材齢 3 日で脱枠を行った。本報で用いる供試体記号の一例を図－２に示す。

2.2. 曲げ強度実験結果と考察

各供試体の曲げ強度 f_f およびその過程における曲げ応力－ひずみ関係を図－３に示す。なお、ここに示す曲げ応力は、平面保持則に基づいて簡易的に算定したものである。これらの結果か

表－１ 配合条件

配合記号	W/P (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					
			C	W	Ex	S	G	Ad
Ex0	44	44	355	156	0	789	1031	5.3
Ex20		47	335		20			5.0
Ex30		48	325		30			4.9
Ex40		50	315		40			4.7



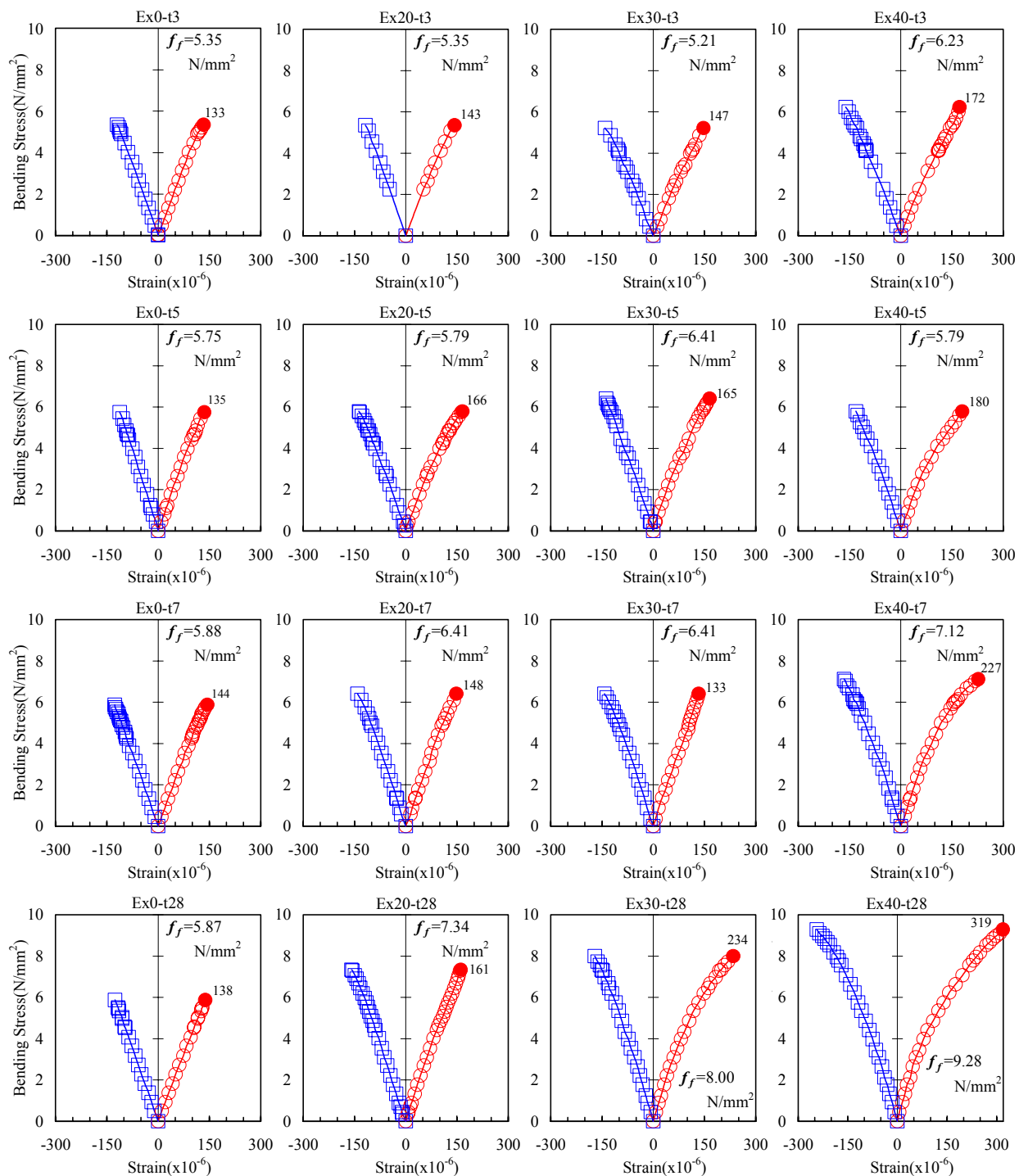
図－１ 供試体形状および載荷方法

膨張材量
(0, 20, 30, 40kg/m³)
試験材齢
(3, 5, 7, 28日)
Ex20－t28
(配合記号)

図－２ 供試体記号の一例

ら、普通コンクリート(Ex0)に比べ、膨張コンクリート(Ex20, Ex30, Ex40)は、曲げ強度 f_f が高くなる傾向がある。また、膨張材量が増えるにつれ、ひび割れ発生までのひずみが大きくなり、コンクリートの(みかけの)伸び能力が大きくなっている。これは、鉄筋による軸拘束を受ける膨張コンクリートの場合、図－４の模式図に示すように、実質的に圧縮場から(曲げ)引張場に移行するまでの初期応力(プレストレス)および初期圧縮ひずみ(プレストレイン)が付与されるためと考えられる。また、普通コンクリート(Ex0)や膨張コンクリート(Ex20)では、等曲げ区間における引張ひずみ挙動(下縁)は、いずれの材齢においても、限界ひずみ ϵ_{Lim} までほぼ線形となっているが、膨張コンクリート(Ex30, Ex40)では、膨張材量が増加するにつれ、既往の研究³⁾においても指摘されているように、限界ひずみ ϵ_{Lim} までのひずみ挙動の非線形性がより顕著にあらわれる結果となった。

特に、材齢28日の膨張コンクリート(Ex30,



● : ひび割れ発生時の(最大)引張ひずみ=限界ひずみ ϵ_{Lim} ※曲げ強度 f_f =ひび割れ発生時の曲げ応力 (N/mm²)

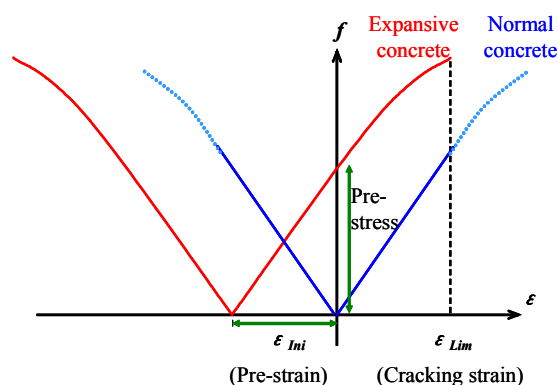
図-3 曲げ応力-ひずみ関係

Ex40)においては、曲げ応力に対して強い非線形ひずみ挙動を示した。このようなコンクリートでは、初期圧縮ひずみが比較的大きく、上縁ではこれに曲げ応力に伴うひずみ増分が加わるため、比較的高い圧縮応力作用下におけるひずみ挙動となることから、いっそう非線形性が強く表れたものと考えられる。

3. 曲げ実験に基づく力学性状評価

3.1. みかけの伸び能力(最大引張ひずみ)と初期圧縮ひずみ(プレストレイン)の推定

曲げ実験で得られた各コンクリートの最大引張ひずみ(みかけの伸び能力)と膨張コンクリート(Ex20, Ex30, Ex40)の初期圧縮ひずみ(プレス



図－４ 曲げ応力－ひずみ関係模式図

トレイン)の推定結果を表－２にまとめて示す。ここで、各コンクリートの実質的な伸び能力が同等と仮定すると、曲げ実験で得られた膨張コンクリート(Ex20, Ex30, Ex40)の最大引張ひずみから、普通コンクリート(Ex0)の最大引張ひずみ(=実質的な伸び能力)を減じた値が、コンクリートに導入されていた初期圧縮ひずみ相当と考えられる(図－４参照)。

3.2. みかけの圧縮・引張ヤング係数

前章で示した曲げ応力－ひずみ関係を基に、みかけの圧縮・引張ヤング係数を算出した(表－３参照)。この圧縮・引張ヤング係数の模式図を図－５に示す。この図に示すように、鉄筋による軸拘束を受けた膨張コンクリートでは、無載荷状態においても初期圧縮ひずみ(プレストレイン)が生じているため、その初期圧縮ひずみおよび同時点における圧縮ヤング係数に応じた初期応力(プレストレス)も作用することとなる。

3.3. 初期応力(プレストレス)の推定

本研究では、最大引張ひずみの差異から求めた表－２の初期圧縮ひずみに対し、表－３で示したみかけの圧縮ヤング係数を乗じることで、膨張コンクリートに導入された初期応力(プレストレス)の推定ができると考えた。そして推定された初期応力に、同じ水粉体比W/P(44%)の普通コンクリート(Ex0)の曲げ強度 f_f を加算することで、各膨張コンクリート(Ex20, Ex30, Ex40)の曲げ強度 f_f の推定を行った。材齢28日における推定曲げ強度 f_f と実験で得られた膨張コンクリートの曲げ強度 f_f の比較を図－６に示す。

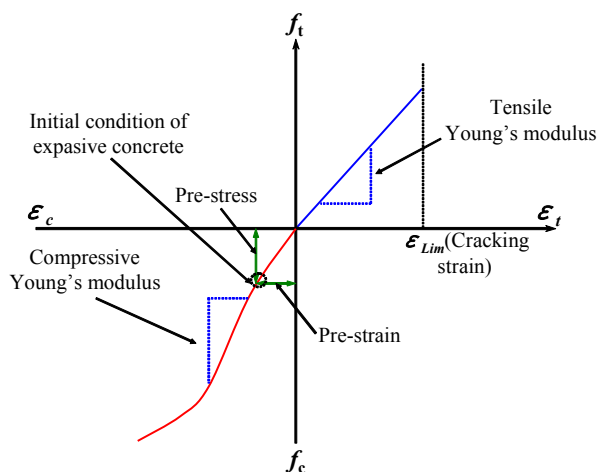
表－２ 初期圧縮ひずみと最大引張ひずみ($\times 10^{-6}$)

	t3	t5	t7	t28
Ex0	0 (133)	0 (135)	0 (144)	0 (138)
Ex20	-10 (143)	-31 (166)	-4 (148)	-23 (161)
Ex30	-14 (147)	-30 (165)	--- (133)	-96 (234)
Ex40	-39 (172)	-45 (180)	-83 (227)	-181 (319)

※ ()内は最大引張ひずみ

表－３ みかけの圧縮・引張ヤング係数

供試体記号	みかけのヤング係数 (kN/mm ²)	
	圧縮	引張
Ex0-t3	44.83	41.43
Ex0-t5	48.34	43.47
Ex0-t7	46.52	42.93
Ex0-t28	46.65	43.97
Ex20-t3	45.77	40.18
Ex20-t5	46.21	41.25
Ex20-t7	49.11	43.12
Ex20-t28	49.11	45.64
Ex30-t3	41.43	38.10
Ex30-t5	49.11	45.67
Ex30-t7	48.62	46.65
Ex30-t28	51.00	46.52
Ex40-t3	41.74	38.10
Ex40-t5	48.62	38.43
Ex40-t7	49.11	44.20
Ex40-t28	49.96	46.41



図－５ 曲げ応力下にある膨張コンクリートの応力－ひずみ状態

図－６に示すように、膨張コンクリート(Ex20)では、曲げ強度 f_f の実験値 7.34N/mm^2 に対して、推定曲げ強度 f_f は 7.00N/mm^2 とほぼ同程度となった。しかしながら、Ex30, Ex40 と膨張材量が多くなるにつれて、推定値が実験値を上回り、両者の乖離が大きくなった。これは前述したように、膨張材量が増加するにつれ、非線形なひずみ挙動を示し、生じるひずみがより

大きくなることから、そのひずみ差に基づく初期圧縮ひずみにみかけの圧縮ヤング係数を乗じた場合、実際に作用する初期応力よりも推定初期応力を過大に評価したためと思われる。膨張コンクリート(Ex20)の結果では、ひび割れ発生まではほぼ線形的なひずみ挙動を示したことから、上記の手法によっても、概ね妥当な初期応力を推定できたものと思われる。

3.4. 有効初期圧縮ひずみの推定

図-6に示した結果より、前節における推定方法では、初期応力に寄与する初期圧縮ひずみ(有効初期圧縮ひずみ)を適切に考慮できないことから、結果的に初期応力を過大評価する可能性が窺えた。そこで本研究では、図-7に示す概念図に基づき、最大曲げ応力(=曲げ強度)作用時における線形ひずみ成分を算定し、有効初期圧縮ひずみとして評価した。膨張コンクリート(Ex20, Ex30, Ex40)について、求めた有効初期圧縮ひずみと有効引張ひずみを表-4に示す。なお、先述のみかけの引張ヤング係数と曲げ強度 f_f の実験値から有効引張ひずみを求め、さらにEx0の最大引張ひずみ(=実質的な伸び能力)を減じることで有効初期圧縮ひずみを算定した。また、表-4には比較のため、前節の初期圧縮ひずみも併せて示している。

3.5. 有効初期圧縮ひずみによる初期応力推定

前節の有効初期圧縮ひずみを用いて、初期応力を再評価し、各膨張コンクリートの曲げ強度の推定を試みた。この推定曲げ強度と実験値の比較を図-8に示す。

図-8に示すように、各実験ケースの曲げ強度 f_f (実験値)に対して、この有効初期圧縮ひずみを用いた推定方法により、概ね適切な推定曲げ強度 f_f を与えていることが分かる。これは、Ex30, Ex40と膨張材量が多いコンクリートにおいても、その初期応力の推定が概ね妥当であったものと推察される。本手法によれば、断面中央に鉄筋を配したRCはりの曲げ実験のみから、初期応力を受ける膨張コンクリートの力学性状(主にひび割れ抵抗性)を比較的容易に評価できるため、

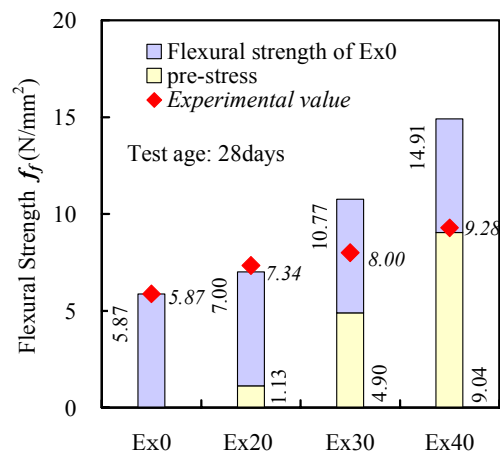


図-6 推定曲げ強度と実験値の比較

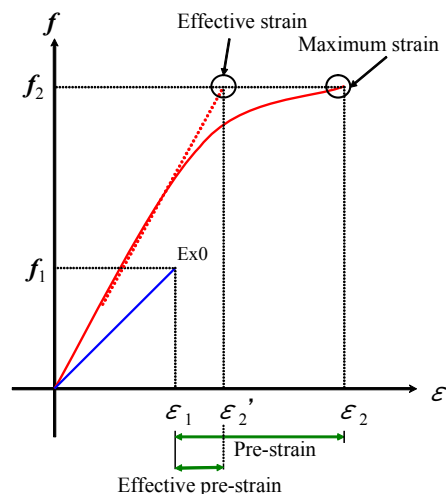


図-7 有効初期圧縮ひずみと有効初期応力

表-4 有効初期圧縮ひずみと有効引張ひずみ

$\times 10^{-6}$	t3	t5	t7	t28
Ex20 (推定前)	-10 (143)	-31 (166)	-4 (148)	-23 (161)
Ex20 (有効)	0 (133)	-5 (140)	-5 (149)	-23 (161)
Ex30 (推定前)	-14 (147)	-30 (165)	--- (133)	-96 (234)
Ex30 (有効)	-4 (137)	-5 (140)	--- (137)	-34 (172)
Ex40 (推定前)	-39 (172)	-45 (180)	-83 (227)	-181 (319)
Ex40 (有効)	-31 (164)	-16 (151)	-17 (161)	-62 (200)

※ ()内は有効引張ひずみ

今後より多くの膨張コンクリートの利用において、有効な評価手段になるものと思われる。

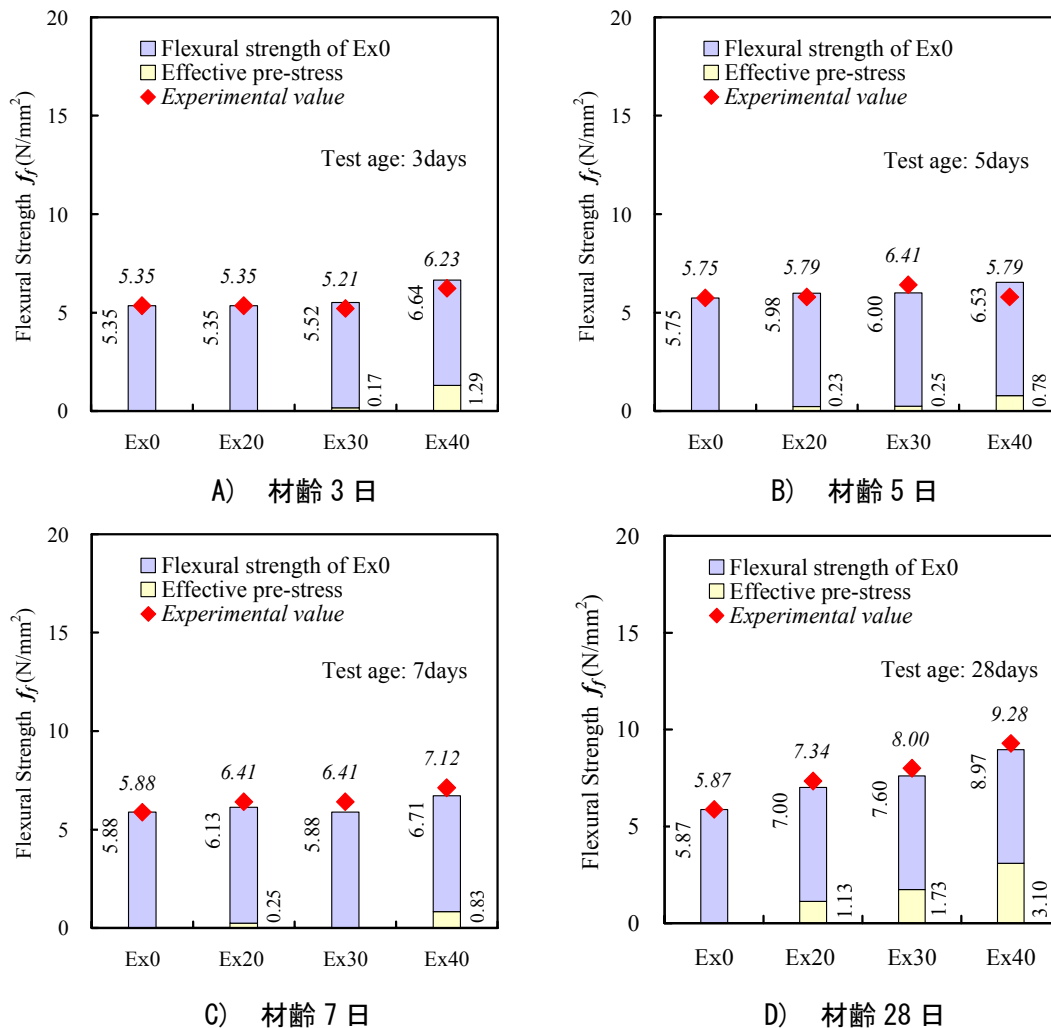


図-8 有効初期圧縮ひずみを用いた推定曲げ強度と実験値の比較

4. まとめ

本研究は、膨張コンクリートを用いた RC はりの曲げ実験から、膨張コンクリートに生じる初期応力と初期圧縮ひずみの推定を試みた。本論文のまとめを以下に挙げる。

- (1) 膨張コンクリートは、膨張材量が増加するにつれ、初期圧縮ひずみが大きくなることで、限界ひずみまでのひずみ挙動の非線形性がより顕著にあらわれる。
- (2) 実質的な伸び能力を一定と仮定し、普通コンクリートと膨張コンクリートの最大引張ひずみ差から初期圧縮ひずみと初期応力を推定した。
- (3) (2)の方法で推定した初期応力に普通コンクリートの曲げ強度を加算して求めた膨張コンクリートの曲げ強度は、膨張材量が増加するにつれて実験値と推定値の乖離が大きくなった。

るにつれて実験値と推定値の乖離が大きくなった。

- (4) 非線形なひずみ挙動を示す膨張コンクリートについて、有効初期圧縮ひずみの推定方法を考案し、これに基づく曲げ強度の推定を行ったところ、概ね妥当な評価が可能となった。

参考文献

- 1) 濱岡洋亘, 石田邦洋, 吉武 勇, 浜田純夫: 低添加型膨張材を用いた RC はりの曲げ強度と軸方向鉄筋のひずみ分布, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp167-172, 2006.
- 2) 日本橋梁建設協会: 場所打ち PC 床版における膨張材の有効性評価検討報告書, 2004.10.
- 3) 細田 暁, 岸 利治: 膨張モルタルの非線形挙動とひび割れ抵抗性の機構について, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.13-29, 2001.8.